

УДК 535.41

В.С. Терентьев, В.В. Коняшкин, В.А. Симонов, Э.Г. Косцов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

**МОЭМ-РЕЗОНАТОР ВОЛОКОННОГО ОТРАЖАТЕЛЬНОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

Цель работы состоит в разработке конструкции и технологии перестраиваемого резонатора волоконного ОИ на основе микрооптоэлектромеханической (МОЭМ) структуры. Описана схема нового варианта волоконного отражательного интерферометра (ОИ) с резонатором на основе МОЭМ-зеркала. Проведено моделирование основных электромеханических характеристик упругой балки, используемой в качестве заднего зеркала резонатора. Преимущество рассматриваемой схемы ОИ заключается в существенном упрощении технологии изготовления резонатора по сравнению с МОЭМ-интерферометром Фабри–Перо, так как одно из зеркал может быть непрозрачным и выполняться в виде металлической балки. Представленные экспериментальные исследования показывают, что на основе МОЭМ-элементов возможно достижение высоких частот перестройки резонансной длины волны резонатора во всем диапазоне области свободной дисперсии.

Ключевые слова: волоконный отражательный интерферометр, микрооптоэлектромеханическая структура.

V.S. Terentyev, V.V. Konyashkin, V.A. Simonov, E.G. KostsovFederal State Scientific Institution Institute of Automation and Electrometry
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation**MOEM RESONATOR OF FIBER REFLECTION
INTERFEROMETER**

The aim of the paper is to design the tunable cavity for fiber Reflection Interferometer (RI) based on Micro-Opto-Electro-Mechanical Structure (MEMS). The scheme of novel fiber RI with cavity based on MOEMS-mirror is described. The main electromechanical properties of the elastic beam, which is used as back mirror if the RI, are calculated. The advantage of the proposed RI design over the MOEMS Fabry-Perot interferometers is in the significant simplification of the cavity production technique, because the back mirror can be non-transparent and made of metal beam. The experimental investigations show, that MOEMS elements suit for obtaining high frequency of resonance wavelength tuning over the free spectrum range.

Keywords: fiber reflection interferometer, micro-opto-electromechanical structure.

Введение

Отражательный интерферометр (ОИ) представляет собой двухзеркальный многолучевой интерферометр с линейным резонатором типа интерферометра Фабри–Перо (ИФП). ОИ предназначен для работы в отраженном свете, а его спектральная аппаратная функция в отражении может иметь достаточно произвольную форму [1]. В частности, ОИ доступна форма в виде узких светлых полос на темном фоне, что подобно аппаратной функции ИФП в режиме пропускания. Такая форма интерференционных полос очень удобна для селекции излучения в лазерных резонаторах.

Ранее нами были созданы объемные варианты перестраиваемых ОИ [2] и их волоконные аналоги [3, 4]. По сравнению с другими широко распространенными волоконными методами селекции в отраженном свете, такими как волоконная брэгговская решетка, кольцевые волоконные и микрорезонаторы, преимущество ОИ заключается в возможности существенного укорочения длины резонатора, вплоть до нескольких микрометров, что снижает зависимость параметров устройства от вибраций и вариаций температуры. Кроме того, ОИ может иметь большие спектральные диапазоны перестройки (аналогично волоконным ИФП-фильтрам). По сравнению с технологией отражательных перестраиваемых полупроводниковых фильтров Вернье (ПФВ) [5], которая в последнее время активно исследуется и разрабатывается применительно к селекции длин волн в лазерных диодах [6], ОИ имеет некоторые преимущества. Материалы, из которых сделан волоконный ОИ, имеют по сравнению с полупроводниковыми структурами более высокую радиационную устойчивость. Для работы ОИ требуется только один управляющий сигнал, а не два, как в ПФВ. Аппаратная функция ОИ имеет высокий контраст (>20 дБ), и отсутствуют побочные паразитные максимумы вблизи максимумов отражения.

В рассматриваемой конструкции волоконного ОИ (ИФП) частота перестройки пока сравнительно низкая (до 10 кГц) на всю область свободной дисперсии. Однако микрооптоэлектромеханические устройства (МОЭМ), разработка которых ведется достаточно широким фронтом [7], допускают возможность значительного увеличения указанной частоты – до 1 МГц и более. МОЭМ-элементы имеют значительно более низкую энергоемкость по сравнению с пьезокерамическими актуаторами.

Известны фильтры ИФП на основе МОЭМ-зеркал [8], при этом фотолитографическая технология производства таких зеркал достаточно сложна, так как оба зеркала должны пропускать свет. В этом смысле описываемый ОИ имеет существенное технологическое преимущество, так как одно из зеркал может быть непрозрачным, т.е. изготавливаться по значительно более простой технологии.

Основная цель данной работы состоит в разработке конструкции и технологии перестраиваемого резонатора волоконного ОИ на основе МОЭМ-структуры. В качестве первичной МОЭМ-структуры для экспериментальной проверки работоспособности конструкции была выбрана пленка лавсана с покрытием из тонкого слоя алюминия.

1. Оптическая часть

Один из вариантов оптической схемы резонатора волоконного варианта ОИ представлен на рис. 1. Он состоит из двух волоконных втулок 1 и 2, обращенных своими торцами друг к другу, которые могут быть керамическими, например, из оксида циркония (ZrO_2). В первой втулке 1 размещается входное волокно 3, имеющее световедущие оболочку 4 и сердцевину 5. На торец волокна 3, расположенный внутри канала втулки 1, нанесено переднее асимметричное по коэффициентам отражения зеркало 7. К зеркалу 7 плотно примыкает торец волокна 6

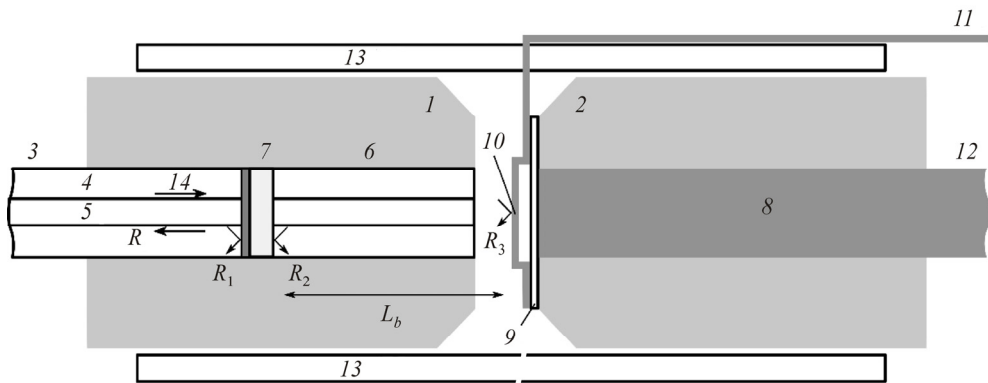


Рис. 1. Схема перестраиваемого волоконного ОИ на основе МОЭМ структуры: 1, 2 – керамические втулки, 3 – оптическое волокно, 4 – оболочка волокна, 5 – световедущая сердцевина, 6 – волокно базы, 7 – асимметричное по коэффициентам отражения зеркало, 8 – тянущий электрод, 9 – диэлектрический слой, 10 – металлическая балка, 11 – изолированный провод, 12 – тянущий электрода, 13 – центраторная пружина, 14 – падающее излучение, коэффициенты отражения: R – ОИ, $R_{1,2,3}$ – зеркал ОИ

базы интерферометра, другой торец которого находится в плоскости торца втулки 1. В другой втулке 2 располагается тянущий электрод 8, который представляет собой металлический проводник (медь, нихром и т.д.). Торцы втулки 2 с электродом 8 полируются, и на электрод наносится диэлектрическое покрытие 9 (например, кремний SiO₂). На диэлектрическом слое формируется металлическая балка 10 путем удаления жертвенного слоя [9] (например, алюминия в 10%-ном водном растворе едкой щелочи).

Амплитудный коэффициент отражения ОИ можно рассчитать по следующей формуле [1]:

$$r = r_1 + \frac{t_1 t_2 t_3 \exp(-i2\psi)}{1 - r_2 r_3 \exp(-i2\psi)},$$

где амплитудные коэффициенты зеркал $r_j = \sqrt{R_j} \exp(i\Psi_j)$, $t_j = \sqrt{T_j} \exp(i\Phi_j)$, $t_1 \equiv t_2$ ($j = 1, 2$ – для разных сторон Z_1 , а $j = 3$ – для Z_2) выражаются через коэффициенты отражения R_j и пропускания T_j в основную моду волокна и их фазы Ψ_j , Φ_j , $\Psi = 2\pi L_b n / \lambda$, L_b – длина волоконного отрезка между Z_1 и Z_2 , n – коэффициент преломления базы интерферометра (эффективный для основной моды волокна). Из выражения для r следует, что при $R_1 \rightarrow 0$ коэффициент отражения $R = |r|^2$ стремится к функции, подобной ИФП в пропускании, причем при $R_1 > 0$ форма аппаратной функции асимметрична, если комбинация фаз $\Psi_1 + \Psi_2 - 2\Phi_1 \neq m\pi$ (m – целое).

Перестройка резонансной длины волны в таком интерферометре осуществляется изменением длины его резонатора L_b , которая определяется воздушным промежутком между торцом втулки 1 и балкой 10, а также волокном базы 6. В данном случае для этого может быть использован прогиб мембраны. Размер воздушного промежутка между торцом волокна 6 и балкой 10 составляет несколько микрометров. Такая небольшая величина промежутка необходима, чтобы свет, распространяющийся по базе интерферометра, имел пренебрежимо малые потери на рассеяние. Также воздушный промежуток необходим для небольшого свободного перемещения (прогиба) балки 10. Втулки 1 и 2, помимо центраторной пружины 13, могут быть закреплены во внешнем корпусе с помощью цементирующего компаунда. Внешний корпус

(не показан на рис. 1) может быть выполнен из жесткого материала (например, металла, керамики), который стабильно фиксирует длину базы L_b при воздействии внешних акустических или иных механических воздействий на фильтр. В рассматриваемой конструкции, в отличие от фильтров на основе цилиндрического пьезокерамического актуатора, внешний корпус не деформируется. Механическое трение в такой системе практически отсутствует (при перемещении пленки имеет место только сопротивление воздуха). Это определяет низкую энергоемкость данного интерферометра.

Для получения узкополосной фильтрации зеркало 7 должно иметь резкую асимметрию коэффициентов отражения, что достигается использованием поглощающего или рассеивающего слоев в сочетании с диэлектрическим многослойным покрытием, определяющим следующие параметры зеркала 7 [3]:

$$|0 \leftarrow R_1 \ll R_2 < R_3 \rightarrow 1, T_{1,2} \approx (1 - R_2) / 2.$$

Заднее зеркало интерферометра находится на внешней стороне балки 10, обращенной к резонатору. Оно высокоотражающее, с коэффициентом отражения $>99\%$, например, состоящее из чередующихся пар диэлектрических покрытий с большой разницей коэффициентов преломления (TiO_2 , SiO_2), нанесенных на балку. Кроме этого сама балка может являться таким зеркалом, если коэффициент отражения от нее достаточно высок (медь $>97\%$ на длине волны 1550 нм), также слой серебра толщиной 100 нм имеет высокий коэффициент отражения на длине волны 1550 нм. Осаждаемые слои могут существенно повлиять на жесткость балки, поэтому необходимо проводить анализ ее электромеханических свойств.

2. Электромеханическая часть

Между балкой 10 и слоем 9 образуется воздушный промежуток d_1 до нескольких микрон (рис. 2). Балка 10 и электрод 8 не имеют электрического контакта между собой. Покрытие 9 предохраняет от короткого замыкания балки 10 на электрод 8. Контакт 11, соединенный с балкой 10, и контакт 12 электрода 8 выведены наружу устройства.

При подаче на электроды разницы потенциалов U на балку 10 начинает действовать электростатическая сила F , стремящаяся сблизить их:

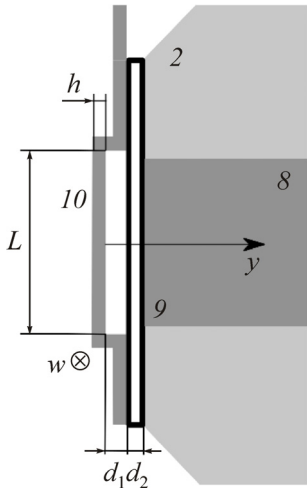


Рис. 2. Схема балки: L – длина балки, h – толщина, w – ширина балки, d_1 – толщина воздушного промежутка, d_2 – толщина диэлектрического слоя 9, 8 – электрод, y – ось положения центра балки

$$F = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 S U^2}{2(d_1 + d_2 \varepsilon_1 / \varepsilon_2)^2}, \quad (1)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, ε_1 – диэлектрическая проницаемость воздуха, d_1 – толщина воздушного промежутка между 9 и 10, индекс «2» относится к соответствующим величинам для диэлектрического слоя 9, S – площадь контактной области балки (электрода).

Временную зависимость центральной точки балки от времени (прогиб) y балки можно получить из уравнения колебаний балки [10, 11]:

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 y}{dt^2} + R \frac{dy}{dt} + Gy = G(y) = \\ = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 S U^2}{2(d_1 + d_2 \varepsilon_1 / \varepsilon_2 - y)^2}, \quad (2) \\ G = 16 E w (h / L)^3, \end{aligned}$$

где t – время, $y = y(t)$ (см. рис. 2), M – масса балки, R – коэффициент сопротивления (воздуха), G – жесткость балки, E – модуль Юнга вещества балки, w – ширина, h – толщина, L – длина балки. В стационарном случае, когда на балку приложено постоянное во времени напряжение, уравнение (2) приобретает вид:

$$Gy = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 S U^2}{2(d_1 + d_2 \varepsilon_1 / \varepsilon_2 - y)^2}. \quad (3)$$

Выражаем из (3) зависимость напряжения от y :

$$U = \sqrt{\frac{2G}{\varepsilon_1 \varepsilon_0 S} y \left(d_1 + \frac{d_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2} - y \right)^2}. \quad (4)$$

Находим максимум подкоренной функции:

$$y_{\max} = (d_1 + d_2 \varepsilon_1 / \varepsilon_2) / 3,$$

в которой можно определить напряжение срыва, т.е. такое максимальное напряжение U_{\max} , при котором силы, противостоящие прогибу балки, не могут уже справиться с нарастающей электростатической силой, и балка необратимо прижимается к поверхности слоя 9 (эффект схлопывания):

$$U_{\max} = \sqrt{\frac{128Eh^3}{27\varepsilon_1\varepsilon_0L^4}(d_1 + d_2\varepsilon_1/\varepsilon_2)^3}. \quad (5)$$

Деформация (прогиб поверхности) балки должна быть больше половины длины волны света λ , чтобы интерферометр перестраивался на одну область свободной дисперсии $y_{\max} > \lambda/2$. Отсюда следует ограничение на значение d_1 , так как с увеличением d_1 растет и $U_{\max} \sim d_1^{3/2}$, его величина ограничивается электрическим пробоем зазора в соответствии с законом Пашена для воздуха, в данном случае $U_{\max} < 300$ В. По формуле (5) и указанным ограничениям можно определить допустимый диапазон изменений d_1 , необходимый для работы устройства:

$$\frac{3\lambda}{2} < d_1 + \frac{d_2\varepsilon_1}{\varepsilon_2} < \sqrt[3]{U_{\max}^2 \frac{27\varepsilon_1\varepsilon_0L^4}{128Eh^3}}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что d_1 , которая определяется толщиной жертвенного слоя, должна быть сравнительно большой (более 2 мкм на длине волны 1550 нм), однако, по-видимому, магнетронный метод напыления позволяет достичь таких толщин.

Первая резонансная круговая частота ω колебаний балки определяется как

$$\omega = \sqrt{G/M}. \quad (7)$$

Задавая геометрические размеры балки, можно регулировать резонансную частоту и время отклика системы на внешние воздействия.

3. Результаты эксперимента

Использование конструкции, соответствующей схеме на рис. 1, дало возможность проведения эксперимента по перестройке длины резонатора L_b , образованного торцом оптического волокна (ОВ), закрепленного в волоконной втулке (ВВ), и алюминиевого слоя толщиной 70 нм, нанесенного на лавсановую пленку толщиной 4 мкм, которые представляют собой балку (Б) (рис. 3, а). Волокно ВВ находится в цен-

траторной пружине (ЦП), которая прижимает натянутую пленку. Электрод Э имеет электрический контакт с алюминиевой пленкой. Тянувший электрод ТЭ представляет собой металлический винт М2 с отполированным торцом конусовидной формы, который может прецизионно вкручиваться по резьбовому каналу (РК). Данная конструкция пока

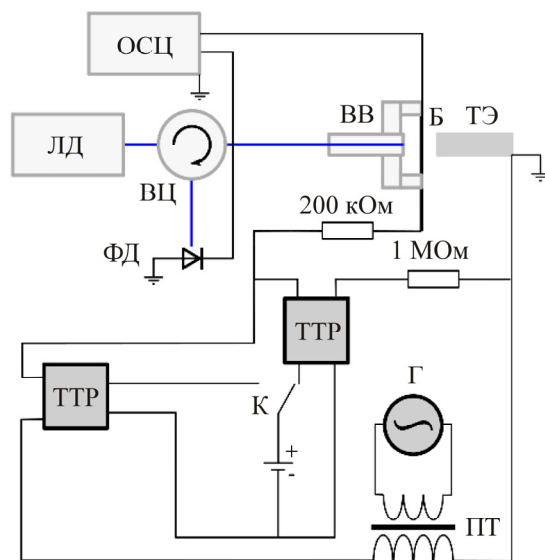
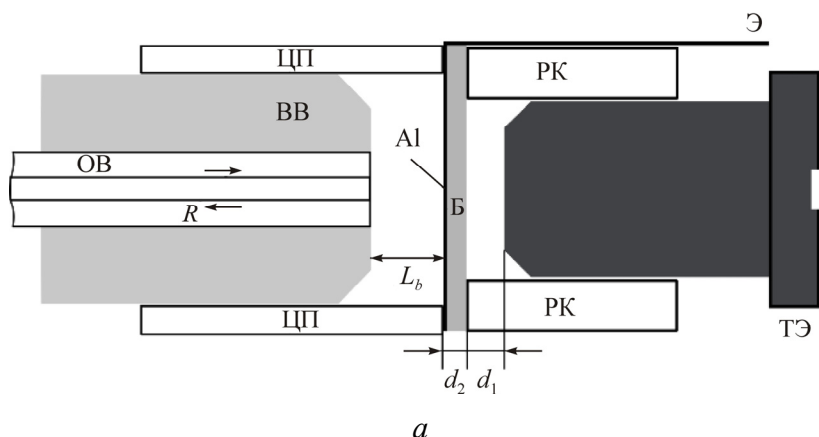


Рис. 3. Оптическая (а) и электрическая (б) схемы эксперимента: ЦП – центраторная пружина, ОВ – оптическое волокно, Al – алюминиевая пленка на лавсане, РК – резьбовое крепление, электроды: Э – Al пленки, ТЭ – тянущий винтовой, ОСЦ – двухканальный осциллограф, ЛД – одночастотный лазерный диод 1530 нм, ВВ – волоконная втулка, Б – балка, ФД – фотодетектор, ТТР – твердотельное реле, Г – звуковой генератор, ПТ – повышающий трансформатор, К – ключ

не включала в себя асимметричного зеркала, это предполагается сделать в дальнейшем. Лазерный диод (ЛД) служил источником одночастотного излучения $\lambda = 1530$ нм, которое через ВЦ подавалось на втулку ВВ и балку Б (рис. 3, б). Отраженный от интерферометра свет, проходя ВЦ в обратном направлении, попадал на фотодетектор с усилителем (ФД). Сигнал с ФД фиксировался на втором канале цифрового осциллографа Tektronix TDS 3032B (ОСЦ). Электрическая схема включает в себя твердотельные реле G7DA-48 (ТТР), которые включаются при подаче на них постоянного напряжения 15–32 В с помощью ключа (К) таким образом, чтобы при резком снятии с балки напряжения конденсатор Б–ТЭ разряжался через резисторы, указанные на схеме, и выделялся в виде омических потерь, разряжая конденсатор и исключая пробой зазора.

Генератор переменного напряжения (Г) – звуковой генератор ГЗ-53 с максимальным напряжением 3 В. С помощью повышающего трансформатора ТТП-3 (ПТ) напряжение усиливалось до амплитуды 250 В. Электрический сигнал с балки подавался на первый канал осциллографа.

Ширина пленки лавсана с алюминием $w_a = 0,675$ мм, длина $L_a = 2$ мм. Величина воздушного зазора $d_1 \approx 10$ мкм ($d_2 = 4$ мкм). Учитывая жесткость лавсана, $G_a = 2,5$ ГПа, по формуле (7) первая собственная частота равняется $f_a = \omega_a/2\pi = 856$ Гц.

Поскольку плавная перестройка фильтра более интересна, чем резонансная, для прецизионного контроля пика отражения, на рис. 4 приведены сигналы с осциллографа в режиме сканирования при частотах меньше f_a . На верхнем графике: U_1 – первый канал от времени; на нижнем: U_2 – второй канал от времени. Как видно (верхний график), на пленку подается напряжение $|U_1| = 250$ В, что достаточно, чтобы переместить пленку и изменить интенсивность отражения от интерферометра. Перестройка базы нелинейная от времени, так как, во-первых, сила, действующая на пленку, зависит от напряжения по формулам (2), (3), во-вторых, возможно, материал балки пластично деформировался и отсутствовало натяжение, резонансные свойства немного изменились. Сигнал U_2 с фотодетекторов симметричен относительно вертикальной штриховой линии, так как модуль напряжения U_1 одинаков. Зависимость U_2 от времени обладала высокой повторяемостью во времени. На обратном ходе U_1 наблюдалось смещение кривой U_2 относи-

тельно того, что представлено на рис. 4, также стабильное во времени, похожее на гистерезис у пьезокерамики.

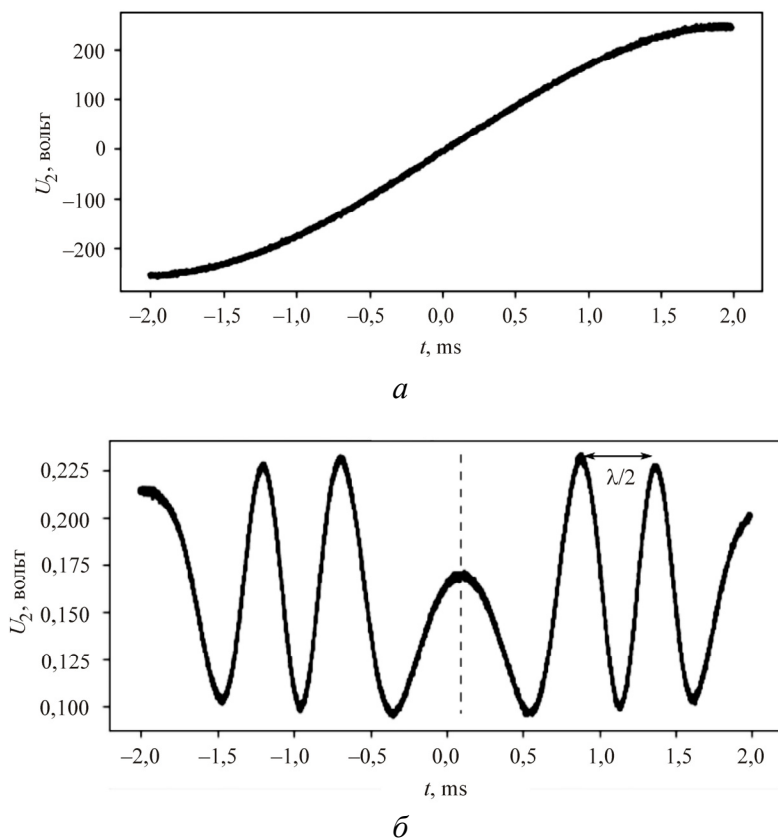


Рис. 4. Сигналы с осциллографа: *а* – U_1 – напряжение с первого; *б* – U_2 – со второго канала осциллографа

Эксперименты показали работоспособность конструкции на основе микрооптоэлектромеханического сканирующего зеркала. Время перестройки на полную область свободной дисперсии согласно рис. 4 составило около 0,5 мс, что соответствует частоте 2 кГц. Переход к более жесткой и стабильной структуре на основе металлов (бериллиевой бронзы) повысит частотные и оптические характеристики фильтра.

Заключение

Представлена схема волоконного отражательного интерферометра с резонатором на основе микрооптоэлектромеханического зеркала. Приведены основные электромеханические параметры расчета конст-

рукции балки: величина зазор, предельное напряжение и частота колебаний. Преимущество такой схемы заключается в существенном упрощении технологии изготовления резонатора по сравнению с МОЭМ интерферометром Фабри–Перо, так как заднее зеркало может быть непрозрачным и выполняться в виде металлической балки. Полученные экспериментальные результаты дают основание полагать, что на основе МОЭМ-элементов можно получать высокие частоты перестройки резонансной длины волны резонатора на всю область свободной дисперсии в представленной схеме.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИАиЭ СО РАН (№ гос. рег. АААА-А17-117062110026-3). Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» в Институте автоматике и электротехнике СО РАН.

Список литературы

1. Троицкий Ю.В. Многолучевые интерферометры отраженного света. – Новосибирск: Наука, 1985. – 208 с.
2. Терентьев В.С. Многолучевые интерферометры в отраженном свете с «необращенной» аппаратной функцией // Автотметрия. – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 89–98. DOI: 10.3103/S8756699009060119
3. Terentyev V.S., Simonov V.A., Babin S.A. Multiple-beam reflection interferometer formed in a single-mode fiber for applications in fiber lasers // Optic Express. – 2016. – Vol. 24, no. 5. – P. 4512–4518. DOI:10.1364/OE.24.004512
4. Терентьев В.С., Симонов В.А. Волоконный отражательный интерферометр на основе диэлектрической дифракционной структуры для селекции мод волоконного лазера // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 321–330.
5. Super Structure Grating (SSG) for Broadly Tunable DBR Lasers / H. Ishii, Y. Tohmori, T. Tamamura, Y. Yoshikuni // IEEE photonics technology letters. – 1993. – Vol. 4, no. 4. – P. 393–395.
6. Demonstration of Vernier effect tuning in tunable twin-guide laser diodes / R. Todt, Th. Jacke, R. Laroy, G. Morthier, M.-C. Amann // IEE Proceedings – Optoelectronics. – 2005. – Vol. 152, no. 2. – P. 66–71. DOI: 10.1049/ip-opt:20045018

7. Косцов Э.Г. Состояние и перспективы микро- и наноэлектромеханики // *Автометрия*. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 3–52.

8. Monolithically integrated microspectrometer-on-chip based on tunable visible light MEMS FPI / A. Rissanen, U. Kantojärvi, M. Blomberg, J. Antila, S. Eränen // *Sensors and Actuators*. – 2012. – A 182. P. 130–135. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2012.05.023>.

9. Fabrication of nanoscale metallic air-bridges by introducing a SiO₂ sacrificial layer” / Y. Zhang, J. Liu, Y. Li, F. Yang // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2007. – 10(4–5). – P. 194–199. DOI:10.1016/j.mssp.2007.11.004

10. Takamatsu H., Sugiura T. Nonlinear vibration of electrostatic MEMS under DC and AC applied voltage // *International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, Banff, Alta., Canada*. – 2005. – P. 423–424. DOI: 10.1109/ICMENS.2005.89

11. Пленочная электродинамика / В.Л. Дятлов, В.В. Коняшкин, Б.С. Потапов, С.И. Фадеев. – Новосибирск: Наука, Сиб. отдел., 1991. – 248 с.

References

1. Troitskii Iu.V. *Mnogoluchevye interferometry otrazhennogo sveta* [Multipath reflected light interferometers]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 208 p.

2. Terentev V.S. *Mnogoluchevye interferometry v otrazhennom svete s “neobrashchennoi” apparatnoi funktsiei* [Multibeam interferometers in reflected light with “non-reversed” hardware function]. *Avtometriia*, 2009, vol. 45, no. 6, pp. 89-98. DOI: 10.3103/S8756699009060119

3. Terentyev V.S., Simonov V.A., Babin S.A. Multiple-beam reflection interferometer formed in a single-mode fiber for applications in fiber lasers. *Optic Express*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 4512-4518. DOI: 10.1364/OE.24.004512

4. Terentev V.S., Simonov V.A. *Volonkonnyi otrazhatelnyi interferometr na osnove dielektricheskoi difraktsionnoi struktury dlia selektsii mod volokonnoho lazera* [Fiber reflective interferometer based on dielectric diffraction structure for fiber laser mode choice]. *Applied photonics*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 321-330.

5. Ishii H., Tohmori Y., Tamamura T., Yoshikuni Y. Super structure grating (SSG) for broadly tunable DBR lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, vol. 4, no. 4, pp. 393-395.

6. Todt R., Jacke Th., Laroy R., Morthier G., Amann M.-C. Demonstration of Vernier effect tuning in tunable twin-guide laser diodes. *IEE Proceedings – Optoelectronics*, 2005, vol. 152, no. 2, pp. 66–71. DOI: 10.1049/ip-opt:20045018

7. Kostsov E.G. Sostoianie i perspektivy mikro- i nanoelektromekhaniki [State and perspectives of micro- and nanoelectromechanics]. *Avtometriia*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 3-52.

8. Rissanen A., Kantojärvi U., Blomberg M., Antila J., Eränen S. Monolithically integrated microspectrometer-on-chip based on tunable visible light MEMS FPI. *Sensors and Actuators*, 2012, A 182, pp. 130-135.

9. Zhang Y., Liu J., Li Y., Yang F. Fabrication of nanoscale metallic air-bridges by introducing a SiO₂ sacrificial layer. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2007, 10 (4–5), pp. 194-199. DOI: 10.1016/j.mssp.2007.11.004

10. Takamatsu H., Sugiura T. Nonlinear vibration of electrostatic MEMS under DC and AC applied voltage. *International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems*, Banff, Alta., Canada, 2005, pp. 423-424. DOI: 10.1109/ICMENS.2005.89

11. Diatlov V.L., Koniashkin V.V., Potapov B.S., Fadeev S.I. Plenochnaia elektrodinamika [Membrane electrodynamicity]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1991, 248 p.

Получено 11.05.19